第 37 卷第 7 期　　生　态　学　报　　Vol.37,No.7
2017 年 4 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201601040014

臧正, 邹欣庆, 吴雷, 宋翘楚, 吴小伟, 于雯雯.基于公平与效率视角的中国大陆生态福祉及生态-经济效率评价.生态学报,2017,37(7):2403-2414.

Zang Z, Zou X Q, Wu L, Song Q C, Wu X W, Yu W W.Evaluation of ecological well-being and eco-economic efficiency in the Chinese mainland: From the perspective of justice and efficiency.Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2403-2414.

基于公平与效率视角的中国大陆生态福祉及生态-经济效率评价

臧　正[1], 邹欣庆[1,2,3,*], 吴　雷[1], 宋翘楚[1], 吴小伟[1], 于雯雯[1]

1 南京大学地理与海洋科学学院,南京　210023

2 中国南海研究协同创新中心,南京　210093

3 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室,南京　210023

摘要:基于生态系统服务价值理论,将"人类从生态系统中直接获取或享有的终端产品和服务"界定为生态福祉,从公平与效率视角提出相应表征方法。在此基础上,以中国大陆省区为例,对其 2001—2013 年间的人均生态福祉及生态-经济效率的时空演变格局进行实证分析,结果表明:①整体来看,研究时段内中国大陆省际人均生态福祉的基尼系数介于 0.798—0.806 之间,处于极不平均状态;省际生态-经济效率的标准差介于 2.110—7.716 之间,离散程度相对较高;②从时间上看,研究时段内中国大陆省际人均生态福祉及生态-经济效率的收敛趋势(σ-收敛)相对不明显;人均生态福祉具备绝对 β-收敛特征但速度较低(0.16%);生态-经济效率在科技进步及科研投入要素的显著驱动作用下,呈现条件 β-收敛现象。③从空间上看,研究时段内中国大陆人均生态福祉及生态-经济效率在"胡焕庸线"两侧的地域分异现象比较明显,其重心分别位于青海和安徽境内,整体向东北和西北方向移动,移动速度分别为 5.76、3.95 km/a。在高消耗、高污染产业逐渐向中西部转移的背景下,应当基于公平与效率视角权衡生态保护与经济发展问题,促进西部地区生态-经济效率和东部地区人均生态福祉共同提高。

关键词:系统生态学;人类福祉;实证分析;时空异质性;公平与效率

Evaluation of ecological well-being and eco-economic efficiency in the Chinese mainland: From the perspective of justice and efficiency

ZANG Zheng[1], ZOU Xinqing[1,2,3,*], WU Lei[1], SONG Qiaochu[1], WU Xiaowei[1], YU Wenwen[1]

1 *School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing* 210023, *China*

2 *Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing* 210093, *China*

3 *Key Laboratory of Coastal and Island Development (Nanjing University), Ministry of Education, Nanjing* 210023, *China*

Abstract: Terminal products and services that human beings directly acquire or enjoy from ecosystems are defined as ecological well-being, based on the theory of ecosystem services. The relevant characterization methods were established based on the perspective of justice and efficiency. The current study analyzed the spatial and temporal pattern of per capita ecological well-being and eco-economic efficiency from 2001 to 2013 in the Chinese mainland provinces. The results indicated that during the period studied, inter-provincial per capita ecological well-being of Chinese mainland ranged between 0.798 and 0.806, which represents a state of extreme inequality; the standard deviation of inter-provincial eco-economic efficiency ranged from 2.110 to 7.716, indicating the absolute difference was relatively high. The Chinese

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB956503);国家自然科学基金资助项目(41471431)

收稿日期:2016-01-04;　　**网络出版日期:**2016-08-30

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zouxq@ nju.edu.cn

mainland inter-provincial per capita ecological well-being, as well as eco-economic efficiency indicated an inconspicuous tendency of overall convergence (σ-convergence) during the 13 years studied. The per capita ecological well-being showed an absolute β-convergence with a low rate of 0.16%, whereas the eco-economic efficiency showed conditional β-convergence with being driven by significant advancements in science and technology and input from scientific research. Spatially we found that Chinese mainland per capita ecological well-being and eco-economic efficiency exhibited spatial heterogeneity in the northwestern and southeastern directions between the "HU line." Their centers were located in Qinghai (5.76 m per year to the northwest) and Anhui (3.95 m per year to the northwest), respectively. With the background of high-consumption and high-pollution industries gradually moving to the mid-western area, we should strike a balance between ecological protection and economic development, based on the perspective of justice and efficiency, and promote the common improvement of eco-economic efficiency of the western region and per capita ecological well-being of the eastern.

Key Words: ecosystems ecology; human well-being; empirical analysis; temporal and spatial heterogeneity; justice and efficiency

生态系统是生物及周围环境构成的统一整体,是人类赖以生存并享有美好生活状态的保障;生态系统具有服务功能,可为人类生存创造一系列自然环境条件及经济、社会效益,与制造业资本、人力资本共同构成人类福利,是实现可持续发展的基础[1-4]。随着局部地区土地开发利用强度逐渐加大,生态系统服务与人类福祉的联系日益受到重视:生态系统服务研究范式逐渐由自然科学向自然-社会科学结合的方向转变[5-6],研究手段由初期侧重生态系统服务的货币化研究[7-8]、逐渐转向在自然-社会复合生态系统视域内开展综合研究[9-10];随着研究视角不断扩展,人们发现各种类型生态系统服务之间不仅存在着权衡关系[11-12],同时具有彼此协同关系[13-14],局地生态系统服务与人类福祉之间的矛盾关系日趋复杂化[15-16],国外学者就此开展了一系列理论分析及实证研究[17-21]。

当前中国正在积极推动生态文明建设,提出要把良好的生态环境作为最公平、最普惠的民生福祉,生态系统服务与人民福祉的密切联系日益受到政府及广大学者重视:李琰等、李双成等提出从地理学视角研究生态系统服务的权衡与协同问题[22],构建了连接人类福祉的多层次生态系统服务分类体系[23],据此提出基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架[6]。生态系统的地域分异致其与人类福祉的关联具有显著的空间异质性,需要通过因地制宜的生态系统管理措施开展综合管理:李双成等认为相关研究应以生态系统服务与区域经济-社会系统内化消费的耦合联系作为核心[24],综合分析区域经济-社会系统与自然资本的双向响应;甄霖等通过文献分析发现有关生态系统服务消费的理论研究正在向消费行为、消费方式、消费效用及其对环境与经济社会综合影响的定量研究方向转变,据此阐述了脆弱生态区实施生态补偿面临的挑战[25];此外,焦雯珺等、刘雪林等分别从传统农业区和农村社区视角对生态系统服务消费计量方法、受偿意愿等开展了案例研究[26-27],魏云洁等、杨莉等分别以蒙古高原和黄河流域为例对中观尺度的生态服务消费空间差异进行了实证研究[28-29],为推动生态系统管理的区域实践、为促进实现区域人类福祉提高的目标提供了科学依据。

人类与生态系统(如无特殊说明,下文专指自然生态系统)之间存在动态交互作用,一方面人类活动直接或间接影响生态系统变化,另一方面生态系统响应也可引起人类福祉发生变化[4]。纵观国内文献可以发现,当前国内学者正在关注生态系统服务与人类福祉的互动关系研究,但从公平与效率视角对生态系统服务与人类福祉关系进行定量评价及区域比较研究还鲜有报道。鉴于此,本文拟在国内外相关研究成果的基础上,进一步界定生态福祉概念及内涵、结合表征区域生态福祉公平与效率的评价模型,并以中国大陆为例进行实证分析,以期为有关地区制订促进人民福祉及生态效率提升的策略等提供些微参考和借鉴。

1 概念与方法

1.1 生态福祉及生态-经济效率概念、内涵及其表征与评价方法

1.1.1 基于生态系统服务理论的生态福祉概念与内涵界定

福祉是福利的近义词,泛指一切美好的生活状态或生存环境[4],基于千年生态评估计划(Millennium

Ecosystem Assessment, MA)提出的生态系统服务分类框架,将"人类从自然环境中获取或享有的、由生态系统通过初级生产和次级生产提供的、与人类生产和生活直接相关的生态系统服务"定义为生态福祉,即人类从生态系统中直接获取或享有的终端产品和服务。

生态系统服务是生态系统通过一系列生态过程向人类提供的具有一定数量和质量的生态产品和服务[1-2],通常以其货币化形式(生态系统服务价值)进行表征,即生态系统从自然界获得阳光、降水等一系列馈赠之后向人类提供的增值部分。生态系统服务价值不仅包括物质产品、文化娱乐服务等直接利用价值,同时包括维持生态平衡、保护环境等间接利用价值,因此生态系统服务评价过程多存在重复计算问题,为此有学者从人类需求视角、基于四个原则确定生态系统终端产品和服务[3]:受益人愿意支付的、生态系统自然产出的、当系统内其他输入条件不变时受益人仍愿意支付额外费用的、受益者能够直接获取的——本文据此提出生态福祉分类方案,通过建立生态系统功能与生态系统服务类型的关系,进一步阐释生态福祉的内涵[30],其与有关生态系统服务价值的分类、内涵比较如表 1 所示。

表 1　生态系统服务价值及生态福祉分类/内涵比较

Table 1　Comparison of classification and connotation of ecosystem service value and ecological well-being

生态系统服务价值 Ecosystem services value		生态福祉 Ecological well-being
类型 Types[4]	内涵 Connotations[1]	
供给服务 A	食物供给 A1	食物需求 E1
Supply services	原材料供给 A2	能源与原材料需求 E2
	供水 A3	水需求 E3
调节服务 B	通过光合-呼吸作用调节空气质量 B1	空气质量需求 E4
Regulating services	通过温室气体或蒸腾作用改善气候 B2	气候适宜度 E5
	应对环境波动与干扰提供调节服务 B3	
	水文调节 B4	
	通过废弃物处理进行环境质量调节 B5	废弃物处理及吸纳空间 E6
支持服务 C	为土壤形成过程提供保障 C1	土壤营养盐循环及保持 E7
Support services	养分储存及内部循环 C2	
	侵蚀控制及沉积物保持 C3	
	传播花粉 C4	生物多样性保育需求 E8
	生物种群的营养动力学控制 C5	
	为生物定居、迁徙提供场所 C6	
	生物基因的持续保障 C7	
文化服务 D	提供休闲、娱乐活动机会 D1	娱乐及文化需求 E9
Cultural Services	提供非商业用途的文化服务机会 D2	

人类福祉是一个相对宽泛的多维度概念[4],通常以经济、环境和社会 3 个方面福祉为代表,并且具有一定主观性。本文界定的生态福祉与生态系统服务内涵有本质的内在联系,但两者视角不同:前者着眼于人类消费与需求(E1—E3 属人类的资源需求,E4—E8 属环境需求,E9 属精神文化需求)视角,仅包含人类自身依靠当前需求及生产力水平所能获得的终端产品和服务价值;后者则基于生态系统生产与供给视角,不仅包括直接价值,还包括各种间接使用价值、选择价值以及存在价值等。如此区分的目的,是将生态系统产品和服务从以往的人类福祉概念中暂时剥离出来,旨在进一步明确生态系统服务价值与经济、社会维度衡量指标的相互联系,从而促进人们不断提高对生态系统服务的科学认识,有助于进一步反映人类需求变化对生态系统服务的影响[31]。

1.1.2　人均生态福祉及生态-经济效率评价模型

生态系统的时空异质性导致生态系统服务价值的科学计算仍是当前有关研究的难点,计算过程及评价结果往往难以避免不确定性问题。鉴于不同评价单元的生态禀赋、物价及生产力水平存在差异,导致人们对生

态福祉的主观认知及需求不尽相同,臧正等借鉴人均国内生产总值(人均 GDP)、人均生态系统生产总值概念及谢高地等提出的中国陆地生态系统服务价值量化方法[30,32],构建评价人均生态福祉的计量模型如下:

$$\mathrm{PGEW} = \mathrm{GEW}/P = \sum_{i=1}^{6} \sum_{j=1}^{9} (p \cdot g \cdot e_{ij} \cdot a_i/7)/P \tag{1}$$

式中,p 代表原粮市场的粮食平均价格(万元/t),g 代表单位面积耕地的平均产量(t/hm^2),两者可在一定程度上代表特定地区的物价水平及生产力水平;e_{ij}代表基于耕地的食物生产价值得出的不同种类生态系统服务价值的当量因子(无量纲;i、j 分别代表第 i 类生态系统中的第 j 种生态系统服务价值的当量因子,本文中 i = 1—6 分别代表耕地、林地、草地、湿地、水域及未利用地等 6 类生态系统,j = 1—9 分别代表 E1—E9 等 9 种生态福祉),可表征各类生态系统为人类提供产品、服务的能力;a_i代表第 i 类生态系统对应占有的土地面积(hm^2),代表区域资源禀赋(自然条件及生态系统状况等);由此得出的 PGEW 称为人均生态福祉(万元/人,年值;下同),与人均 GDP 相似——同一目标区内不同评价单元之间的 PGEW 值越接近则人均差距越小,表明其公平性越高(反之公平性越低)。

人类生产和生活过程中每年消耗的生态系统服务价值大部分转移、固化到当年的国民经济与社会发展成就之中(通过生态系统服务消费结合劳动力、资本投入实现了区域生态福祉到经济福祉的转化),因此生态系统服务的持续供给是区域可持续发展的基础[30,33]。为进一步衡量作为自然资本投入到经济生产过程中的生态系统服务与相应经济产出的定量关系,臧正等借鉴 Johnston、Mäler 等提出的服务-收益函数及福祉生产函数概念及其定义构建了生态-经济产出效率模型[34-36],进一步表达了人类生态福祉与经济福祉的联系,模型如下:

$$\mathrm{EEOC} = \mathrm{GDP}/\mathrm{GEW} \tag{2}$$

式中,GDP 为地区国内生产总值(万元),代表一个地区的国民经济发展成就;EEOC 为生态-经济产出效率(简称生态-经济效率,无量纲),表征区域国民经济生产过程中生态系统服务到经济收益的转化能力,其值越大表明消费等量生态系统服务获得的经济福祉越大。

1.2 人均生态福祉及生态-经济效率的时空收敛特征检验

经济学领域中“收敛”一词(趋同)源于新古典增长理论[37-39],是指不同经济体之间人均收入水平差距随时间推移而呈现出的下降趋势(称为 σ-收敛),亦指与初期人均收入较高的经济体相比,初期水平较低的经济体人均收入提升速度更快的负相关现象(β-收敛)。该理论指出人均产出的长期增长依赖于技术水平的增长,因此不同经济体的长期增长差异由技术进步差异决定:如果假设技术是一种公共物品,那么不同经济体都将面临同样的技术选择及技术增长机会,所以新古典增长理论预示着经济收敛是一种必然趋势。考虑到生态系统服务在满足人类生态福祉需求时所具有的公共属性,本文将借鉴上述理论假设人均生态福祉及生态-经济效率(以下简称“两指标”)将在长期内趋于同一稳态,进而对 2001—2013 年中国大陆 31 个省区“两指标”的时序收敛特征展开实证检验,以期为进一步探讨人类福祉的时空流动性及公平性提供科学支撑。

1.2.1 时间序列演变趋势的分析方法

(1)应用 σ-收敛模型检验指标是否收敛

为了从整体上掌握中国大陆省际人均生态福祉及生态-经济效率的时序变化趋势,需要对其进行 σ-收敛检验:如果指标序列的标准差呈下降趋势,表明其在样本考察期内具备 σ-收敛特征,即不同省区间人均生态福祉或生态-经济效率的差异逐渐变小。本文拟应用标准差和基尼系数、分别从相对和绝对视角对某一指标的整体收敛趋势进行检验,模型如下:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_{i,t} - Y_t)^2} \tag{3}$$

$$G = \frac{1}{2n^2 Y_t} \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} |y_{j,t} - y_{i,t}|} \tag{4}$$

式中,$y_{i,t}$和 $y_{j,t}$分别为 t 时期单元 i 和单元 j($j \neq i$)的评价指标值,Y_t为全国均值,n 为省区个数,S 为序列标准

差(若 S 呈减小趋势,则序列相对收敛);G 代表基尼系数(如果 G 呈减小趋势则序列绝对收敛;通常 G <0.2 代表差异极小、G>0.5 代表差异悬殊)。

(2)应用绝对 β-收敛模型检验收敛速度

在假设"面板数据中的所有省区土地利用状况及经济、社会发展状况具有同质性"的前提下,如果人均生态福祉或生态-经济效率的增长/下降速度与其初期水平值负相关,表明指标序列具备绝对 β-收敛特征。因此,如果指标序列呈现 σ-收敛现象,可进一步构建两指标年际增长率的回归模型进行绝对 β-收敛检验,模型如下:

$$\ln \frac{y_{i,t+1}}{y_{i,t}} = \alpha + b \cdot \ln y_{i,t} + h_i + k_t + \varepsilon_{i,t} \tag{5}$$

式中,h_i 为各省区的固定效应,反映省区间持续存在的差异;k_t 为各时期的固定效应,代表指标随时间变化的控制因素;如果回归系数 b<0 并且显著,则绝对 β-收敛假设成立,即指标值低的省区上升速率比指标值高的省区快,时段 T 内的收敛速度 $\beta=-\ln(1+b)$、收敛 50%所需的时间 $T_{1/2}=\ln(1/2)/\ln(1-\beta)$。

(3)应用条件 β-收敛模型识别影响因素

考虑到不同省区内部城乡人口比例、产业结构及规模、区域资源禀赋及自然条件等外生条件变量带来的影响和冲击,事实上不同评价单元人均生态福祉及生态-经济效率具有不同稳态,因此有必要进一步识别影响其收敛的主要因素。为此,本文参考有关文献[22,35],从经济与市场因素、社会与文化因素、自然与科技因素等 3 个方面选取外商直接投资(X_1)、进出口总额(X_2)、第三产业比重(X_3)、技术市场成交额占 GDP 比重(X_4)、单位面积内的道路交通里程数(X_5)、大中专学生占地区人口比重(X_6)、年降水量(X_7)、环境技术效率全局参比(X_8)及科技研发投入占 GDP 比重(X_9)等 9 个指标为条件变量,构建条件 β-收敛的检验模型如下:

$$\ln \frac{y_{i,t+1}}{y_{i,t}} = \alpha + b \cdot \ln y_{i,t} + \gamma X_{i,t} + h_i + k_t + \varepsilon_{i,t} \tag{6}$$

式中,若系数 b<0 并且显著,则条件 β-收敛假设成立(即在给定技术条件下,指标值高的省区增长速率比指标值低的省区增长速率慢),否则条件 β-收敛假设不成立;$X_{i,t}$ 为稳态控制常量,γ 为系数(若 γ 为正值,表示相应条件变量为正向驱动人均生态福祉或生态-经济效率提高的因素;反之,若 γ 为负值则表示相应条件变量为制约两者提高的负面因素)。

1.2.2 空间格局演变趋势分析方法

为了从空间视角进一步识别和分析两指标的省际格局及其演变特征,本文将应用重心模型测度考察期内中国大陆省区人均生态福祉及生态-经济效率的重心位置(long, lat)、重心移动距离及方向,以便通过空间格局演变的辅助分析提高检验结果的可靠性,模型如下:

$$\text{long} = \frac{\sum_{k=1}^{31} I_k \cdot \text{long}_k}{\sum_{k=1}^{31} I_k},\quad \text{lat} = \frac{\sum_{k=1}^{31} I_k \cdot \text{lat}_k}{\sum_{k=1}^{31} I_k} \tag{7}$$

$$d_{t+1,t} = C \cdot \sqrt{(\text{long}_{t+1} - \text{long}_t)^2 + (\text{lat}_{t+1} - \text{lat}_t)^2} \tag{8}$$

$$D = (\text{lat}_{k+1} - \text{lat}_k)/(\text{long}_{k+1} - \text{long}_k) \tag{9}$$

式中,单元 k 及单元 k+1 的经纬度坐标分别为(long_k, lat_k)、(long_{k+1}, lat_{k+1});I_k 为单元 k 的待评价指标,本文中即为人均生态福祉或生态-经济效率;C 为距离系数,代表地球表面 1 个经度或纬度之间的平面距离(本文取 111 km);$d_{t+1,t}$ 代表年份 t+1 和年份 t(基年)之间指标重心的移动距离;D 为方向判定系数,D <1 表明重心移动方向在基年位置的(−45°, +45°)或(+135°, +180°)、(− 135°, −180°)范围内,D >1 表明其在(+45°, +135°)或(−45°,−135°)范围内,D =1 表明移动方向在+45°或+135°对角线上,D =0 表明其在 0°或 90°方向上移动。

2 结果分析

2.1 数据来源及处理说明

考虑到数据的可得性以及文章的篇幅所限,本文暂以中国大陆 31 个省区为研究对象就其 2001—2013 年人均生态福祉和生态-经济效率的时空演变特征进行实证检验,数据来源及处理方式如表 2 所示:有关年度各省区年末人口数、地区生产总值及粮食单产等取自国家统计局网站[40];各省区历年原粮市场价格分别以国家发展和改革委员会网站公布的 2012 年相关省区粮食最低收购价及原粮市场谷物平均价为基础(可能与真实情况并不完全相符),结合历年物价指数折算得出[41-44];各省区土地利用面积以中国统计年鉴公布的 2008 年数据为基础,结合中国国家资源环境遥感宏观调查与动态研究所、中国国土资源统计年鉴(光盘版)提供的增减变动数据计算整理得出[45];因统计数据缺失,研究内容暂未包括中国香港和澳门特别行政区、中国台湾省及南海诸岛等。

表 2 有关数据来源及说明

Table 2 Data sources and related explanation

数据名称 Data name	单位 Unit	处理方法 Treatment method
粮食价格 Grain price	万元/t	粮食主产区以 2012 年粮食最低收购价格为基础、其他省区以原粮市场的谷物平均价格为基础,结合历年物价指数折算得出(注)
粮食单产 Grain yield	t/hm^2	当年实际值
土地面积 Land area	hm^2	以中国统计年鉴公布的 2005—2008 年数据为基础,结合 2001—2004 年以及 2009—2013 年度增减变动数据计算得出
总人口 Total population	人	人口为年末数据
国内生产总值 GDP	万元	以 2000 年为基期的可比价

内蒙古为玉米主产区,P 值以玉米最低收购价格为准;河北、山东为小麦主产区,P 值以小麦最低收购价格为准;江西、湖南、广西、四川为中晚稻主产区,P 值以中晚稻最低收购价格为准;黑龙江、吉林、辽宁同为玉米和中晚稻主产区,P 值以两者最低收购价格的均值为准;江苏、安徽、河南、湖北同为小麦和中晚稻主产区,P 值以二者最低收购价格的均值为准;其他 17 个非粮食主产省区的 P 值以同期中国原粮市场的玉米、小麦、稻米价格的均值为准

2.2 时空演变的趋势分析

2.2.1 整体趋势

应用标准差和基尼系数可分别从相对、绝对视角观察不同评价单元之间人均生态福祉及生态-经济效率差距是逐渐拉大/缩小或是保持相对平稳。依据式(1)—(2)计算 2001—2013 年中国大陆 31 省区的人均生态福祉及生态-经济效率,依据式(3)—(4)计算各指标序列的标准差和基尼系数,结果如图 1 所示。

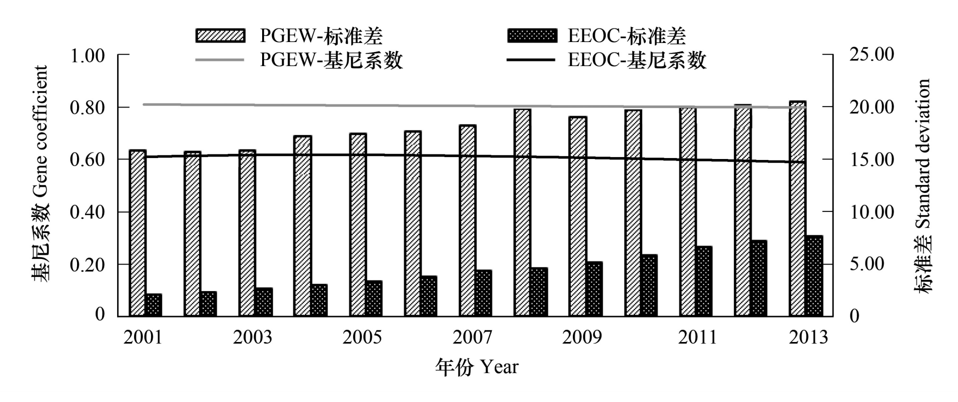


图 1 人均生态福祉及生态-经济效率的 σ-收敛检验结果

Fig.1 Inspection results of σ-convergence test of PGEW and EEOC

人均生态福祉 PGEW (Per capita gross of ecological well-being), 生态经济产出效率 EEOC (Eco-economic output efficiency)

图 1 显示:研究时段内 PGEW 的标准差系数在呈现波动增大趋势,表明人均生态福祉与全国平均值的差距相对增大的省区个数在波动中增多(离散程度增大);EEOC 的标准差呈直线上升趋势(由 2001 年的 2.110 增至 2013 年的 7.716),表明有越来越多的省区生态-经济效率与全国平均值的相对差距在持续增大。从绝对视角来看:考察期内 PGEW 的基尼系数呈直线降低趋势,尽管人均生态福祉的省际绝对差异持续减小,但仍然处于极度不平均状态,历年 G 值介于 0.798—0.806 之间——整体上远高于同期中国大陆居民人均可支配收入的基尼系数(依官方数据[40],2003 年以来其最高值为 2008 年的 0.491);同期 EEOC 的基尼系数(G 值整体接近 0.6)呈先升后降的变化趋势并且小于人均生态福祉的基尼系数,表明省际生态-经济效率即消费等量生态系统服务获得的经济福祉差距已开始减小。综合上述结果可以看出研究时段内中国大陆省际人均生态福祉及生态-经济效率的 σ-收敛趋势相对不明显,表明未来一段时期中国大陆仍将在一定程度上面临省际生态福祉的不公平问题。

2.2.2　收敛速度

从绝对视角来看,图 1 所得结果表明省际人均生态福祉及生态-经济效率的绝对差异呈缓慢下降趋势,因此有必要进一步检验两指标的绝对 β-收敛特征及其收敛速度。首先,依据前文所得结果计算两指标的年均增长率;然后依次进行面板数据的单位根检验(通过取对数使指标序列成为同阶单整序列)、协整检验和 Hausman 检验(人均生态福祉、生态-经济效率增长率的回归模型分别采用固定效应模型和随机效应模型);最后依据式(5)、应用 Eviews 6.0 软件进行最小二乘(OLS)回归分析,回归模型的有关统计结果如表 3 所示。

表 3　人均生态福祉及生态-经济效率的绝对 β-收敛特征检验结果

Table 3　Inspection results of absolute β-convergence test of PGEW and EEOC

指标序列 Index sequence	常数 Constant		系数 Coefficient		R^2	F	DW	β
	α	t-statistics	b	t-statistics				
人均生态福祉 PGEW	0.037725	5.391093***	−0.001625	−1.391395***	0.068491	0.80642***	2.750422	0.001626
生态-经济效率 EEOC	0.128005	36.73077***	−0.001143	−3.002956	0.023468	8.891709	1.621706	0.001145

人均生态福祉 PGEW (Per capita gross of ecological well-being); 生态经济产出效率 EEOC (Eco-economic output efficiency); *** 和 ** 分别代表显著水平位 1%、5%

通过表 3 可以看出:人均生态福祉 PGEW 的增长率回归模型及回归系数的显著性均较高(置信水平为 1%),并且该指标的回归模型拟合效果显著(F 值)、回归系数合理(t 检验显著水平较高),与之相对的是生态-经济效率 EEOC 未通过 5%的置信水平检验;PGEW 的回归模型系数 $b<0$,表明 β 值存在,即中国大陆人均生态福祉具备绝对 β-收敛特征。对比图 1 及表 3 所得结果可以看出,两者传递的信息基本吻合:省际人均生态福祉具备绝对收敛特征但速度缓慢,收敛速度仅为 0.16%;EEOC 的差异变化不大、整体呈先升后降趋势,因此不具备绝对趋同态势。

2.2.3　影响因素

区域自然条件、生态系统生物量差异等无疑导致生态系统服务供给具有空间异质性,而人类个体或群体的心理、社会、经济和文化因素又势必影响区域生态系统服务需求总量及消费强度,因此人均生态福祉、生态-经济效率均会受到诸多自然-人文因素影响。依据式(6)进行两指标序列的条件 β-收敛检验:首先应用 Eviews 6.0 软件对条件变量序列进行单位根检验、协整检验及 Hausman 检验,选择相应模型(PGEW、EEOC 分别选择固定效应和随机效应模型)进行最小二乘回归分析,限于文章篇幅,在证实模型拟合效果较好的前提下,上述检验过程及所得模型参数在此不做详解,仅列出有关统计结果如表 4 所示。

表 4 显示样本观察期内中国大陆人均生态福祉及生态-经济效率的条件 β-收敛模型回归系数均为负值,PGEW 的回归系数 b 及回归模型 F 值因未通过 5%的显著水平而不具备条件 β-收敛特征;EEOC 在 5%的置信水平上具备条件 β-收敛特征:技术市场成交额占 GDP 的比重(X_4)以及科研研发投入占 GDP 比重(X_9)能够显著(置信水平分别为 5%和 1%)驱动生态-经济效率的 β-收敛,表明两者所代表的科学技术水平越高、科技进步速度越快,越有利于生态-经济效率在全国范围内趋同[12]。依据生态现代化理论[46-47],产业化与技术进

步、经济增长与生态环境之间不仅具有潜在兼容性,更是改善生态环境问题的重要驱动因素,尤其是新技术发明的使用可在资源节约、生态恢复及环境保护方面发挥越来越重要的作用——由区域经济增长导致的生态环境问题可以通过"协调生态与经济发展"或进一步的"超工业化"来解决。因此,未来中国应当十分重视科技进步及科研投入对提高人均生态福祉的显著驱动作用,通过持续有力地鼓励技术创新,带动区域生态-经济效率进一步提高,在此基础上结合国土空间利用格局的优化、引导城乡人口的跨区域合理流动、产业结构的布局调整等一系列战略选择,有效降低国民经济与社会发展过程中的自然资源消耗及生态环境损失代价。

表 4 人均生态福祉及生态-经济效率的条件 β-收敛特征检验结果

Table 4 Inspection results of conditional β-convergence test of PGEW and EEOC

参数 Parameter	人均生态福祉 PGEW	生态经济效率 EEOC	参数 Parameter	人均生态福祉 PGEW	生态经济效率 EEOC
α	0.025358	0.131805	X_5	−0.000031	−0.000032
t-statistics	0.933514	4.83948 ***	X_6	−0.010748	−0.000105
b	−0.002041	−0.001586	X_7	0.029001	0.055115
t-statistics	−1.640829	−2.554874 **	X_8	0.000000	0.000000
X_1	0.000240	0.007264	X_9	0.103687	0.008103 ***
X_2	−0.000552	−0.003801	β	0.002043	0.001587
X_3	−0.006119	−0.097094	R^2	0.977860	0.945259
X_4	0.144095	0.457628 **	F	0.698692	1.711282 **

人均生态福祉 PGEW (Per capita gross of ecological well-being), 生态经济产出效率 EEOC (Eco-economic output efficiency), 变量 X_1—X_9 分别代表外商直接投资、进出口总额、第三产业比重、技术市场成交额占 GDP 比重、单位面积内的道路交通里程数、大中专学生占地区人口比重、年降水量、环境技术效率全局参比(代表相对效率)、科技研发投入占 GDP 比重

2.2.4 空间格局

依据式(7)—(9)及有关数据分别计算考察期内两指标的重心位置、移动距离及方向判定系数,结果分别如图 2(人均生态福祉及生态-经济效率按 6 个级别聚类显示)、图 3 所示。

图 2 显示:2001 年,除海南、黑龙江、吉林 3 地外中国大陆东中部其他 16 省区人均生态福祉 PGEW 均低于 1.0(1 万元/人),尤其北京、天津、上海、山东、河南、江苏及安徽等 7 省区,人均生态福祉甚至低于同期中国大陆人均 GDP 平均水平的 0.75 万元[40],表明这些省区生态系统服务供给能力较低,而除了重庆和贵州外西部其它 10 省区则全部高于该值;2007 年,东中部的福建和江西两地 PGEW 达到 1 万元 · 人$^{-1}$以上,其它省区仍然低于同期中国大陆人均 GDP 的平均水平——1.86 万元[40],西部的内蒙古、西藏、贵州 3 地 PGEW 则进一步提高;2013 年,东中部的辽宁、山西、湖北、湖南等 4 地 PGEW 达到 1 万元/人,但人均生态福祉显著高于同期中国大陆人均 GDP 平均水平 4.18 万元的省区仅有内蒙古、甘肃、新疆、青海、西藏等西部 5 省区。整体而言:从地区间的差异来看,研究时段内中国大陆人均生态福祉呈现"西部省区高-东部省区低,中部省区居中"的分布格局;从方位来看,以表征中国人口密度分布的黑河-腾冲一线(即"胡焕庸线")为界,西北高-东南低的多级分布格局较明显,表明经济与人口密集区生态系统服务价值具有较高稀缺性[48]。图 3 显示 2001—2013 年大陆省区的 PGEW 重心位于"胡焕庸线"以西(95.67—96.17°E、33.83—33.97°N)、青海省境内(图 2),合计移动距离为 69.08 km、年均向东北移动 5.76 km,年际变化不大,与图 1 得出的研究时段内整体趋势一致。

图 2 显示 2001 年除了黑龙江之外中国大陆东、中部其他 18 个省区的生态-经济效率 EEOC 均达到或超过了 1.0,表明这些省区对应单位生态系统服务消耗获得的经济福祉较高,除重庆之外西部其他 11 省区则全部低于该值;2007 年东、中部大部分省区 EEOC 进一步提高,西部的陕西、四川、云南、贵州、广西等 5 省区 EEOC 也达到或超过 1.0;2013 年除新疆、甘肃、青海、西藏等西部 4 省区之外,大陆其他省区的 EEOC 整体上持续提高。综合来看,生态-经济效率的空间分布格局与同期省际人均生态福祉恰好相反:地区差异以"胡焕庸线"为界、呈现"西部省区低-东部省区高,中部省区居中"的分布格局,西北-东南方向上的梯度格局更加明显。图 3 显示 2001—2013 年大陆省区的 EEOC 重心处于胡焕庸线以东的 116.42—116.71°E、34.35—34.54°N

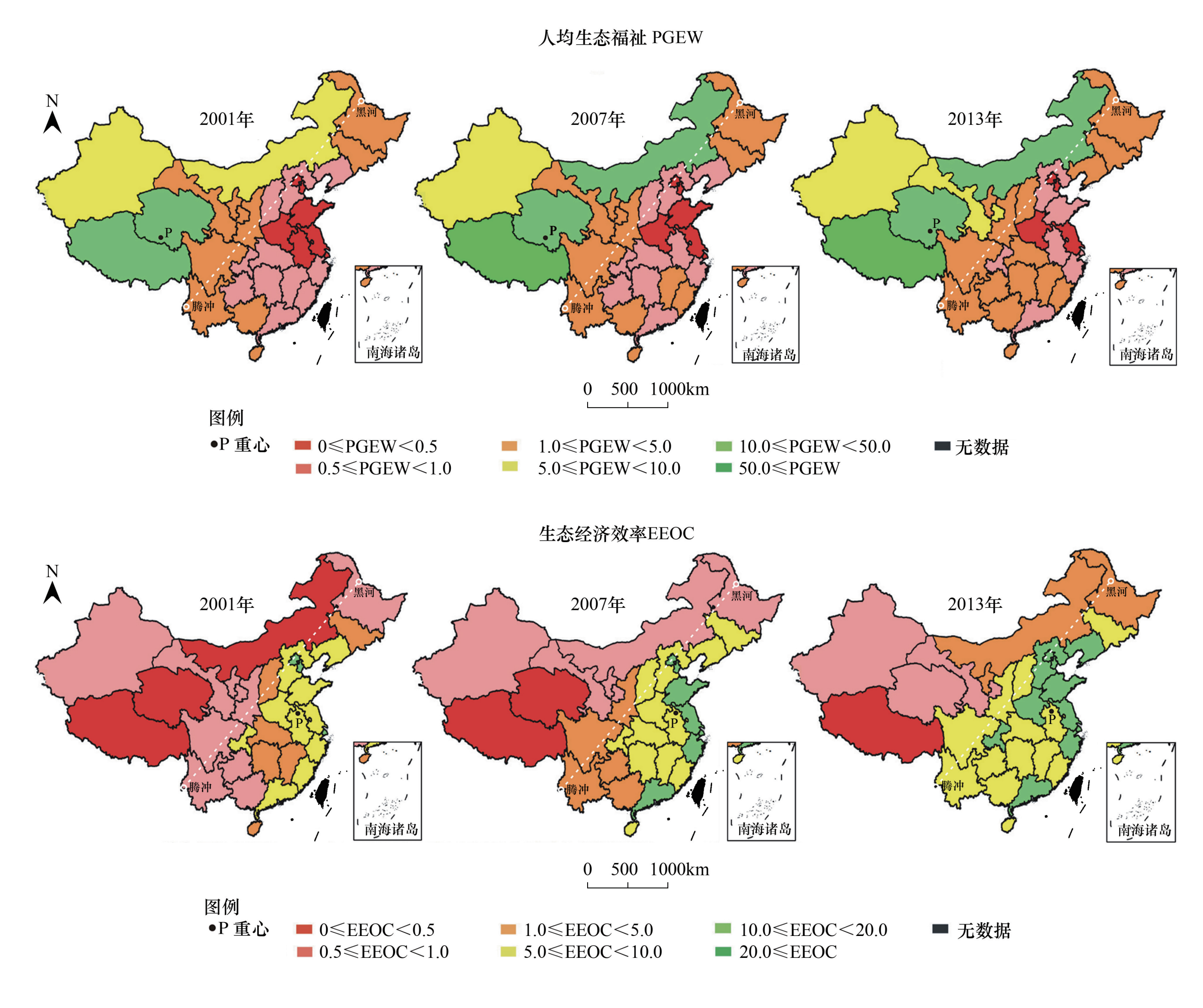


图 2　中国大陆省区人均生态福祉及生态-经济效率的空间格局(2001—2013 年)

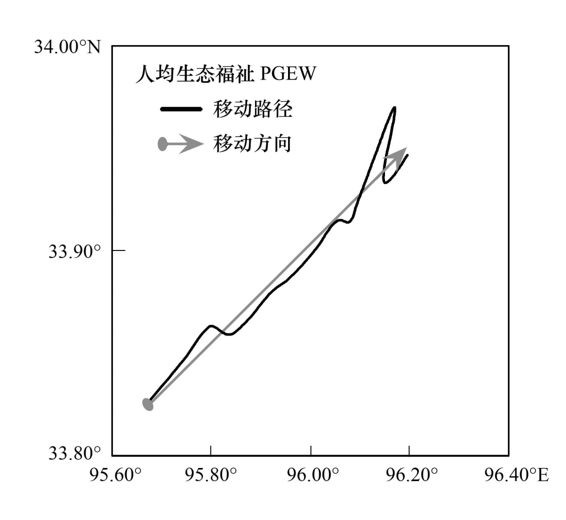
Fig.2　Spatial pattern of PGEW and EEOC in province on the Chinese mainland

PGEW: 人均生态福祉 Per capita gross of ecological well-being(万元/人), EEOC: 生态经济产出效率 Eco-economic output efficiency;东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、海南等 11 省区;中部地区包括吉林、黑龙江、山西、河南、湖北、湖南、安徽、江西等 8 省区;西部地区包括内蒙古、陕西、甘肃、宁夏、新疆、青海、西藏、重庆、四川、贵州、云南、广西等 12 省区

范围内(安徽境内,图 2),先后向东北、西北方向移动,合计移动 47.36 km、年均向西北移动 3.95 km,小于这一时期的 PGEW 重心的移动距离。

3　讨论与结论

本文基于前期有关生态福祉概念及分类研究,及其生产、供给、消费流程的表征与评价研究,进一步提出通过人均生态福祉、生态-经济效率对区域生态文明建设开展定量评价工作。与以往有关生态系统服务的定性研究相比,本文明确提出并界定了生态福祉概念,突出了生态系统服务价值的民生福祉导向;与前人侧重生态系统服务供给与消费的研究模式相比,本文提出基于公平与效率视角对区域人均生态福祉及生态-经济效率进行综合评价,有助于后续研究更进一步地从人类福祉的高度加强对生态系统服务与人类经济、社会发展关系的重视;与以往单纯依据生活质量指数、福祉指数、人类福利指数、人类发展指数进行的人类福祉评价研究相比,本文应用收敛理论、重心模型对区域生态福祉的时空收敛特征进行了全面检验,通过各类检验结果的相互支撑提高了评价结果的可靠性。



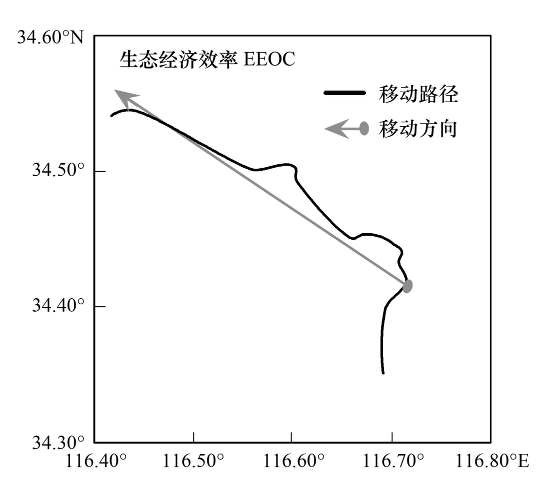


图 3 人均生态福祉及生态-经济效率重心移动路径及移动方向(2001—2013 年)

Fig.3 Moving path and moving direction of PGEW′s gravity and EEOC′s gravity

PGEW: 人均生态福祉 Per capita gross of ecological well-being, EEOC: 生态经济产出效率 Eco-economic output efficiency

从图 2 可以看出,研究时段内中国大陆人均生态福祉及生态-经济效率在胡焕庸线两侧的省际分异现象十分明显,西北部地区生态-经济效率低、人均生态福祉高,为低效-高福祉区,东南部地区则为高效-低福祉区。依据前文证实的省际 PGEW 及 EEOC 同期时序收敛特征可知,考查期内两指标的时空演变格局与近年来中国大陆地区产业转移、人口流动的整体趋势吻合——结合式(1)、式(2)及图 4 可知:随着东部地区的高消耗、高污染产业向西部转移,东部地区以相关产业发展规模减小换得区域生态环境改善,生态-经济效率或其提升速度降低;与此同时,西部地区大量承接相关产业,地区经济规模不断发展壮大但也相应地付出了生态福祉下降的代价,区域生态-经济效率得到显著提升;在科技进步及科研投入要素的驱动作用下,东西部地区之间的产业转移与承接促进了中国大陆地区的生态效率趋同(显著水平达到 5%,表 4)。然而,东部地区密集分布的人口并没有随着相关产业一同向西部转移——第六次全国人口普查结果显示,近年来中国大陆省际人口迁入率大于 10‰的省区均位于东部,而人口迁出率大于 6.5‰的省区则全部位于中西部[49],人口持续东向集聚可能进一步促成如下结果:虽然东部地区生态环境状况得到改善,但随着流入人口增多,可能在一定程度上抑制区域人均生态福祉提高;同样地,由于西部地区人口迁出,尽管高消耗、高污染产业发展使其付出一定环境代价,但其人均生态福祉并未受到显著影响;最终,人口的东向迁移导致全国范围内的人均生态福祉趋同现象不显著(表 4)。

在高消耗、高污染产业逐渐向中西部转移的背景下,应当基于公平与效率视角权衡生态保护与经济发展问题,促进西部地区生态-经济效率和东部地区人均生态福祉共同提高。需要指出的是:人类福祉概念及其内涵的多维特征使之影响因素众多,囿于文章篇幅所限,本文仅立足于公平与效率视角,从经济与市场因素、社会与文化因素、自然与科技因素等几方面选择若干指标,初步识别了中国大陆省际人均生态福祉及生态-经济效率的影响因素,后续研究还需进一步拓宽研究视角,并在此基础上不断丰富评价指标体系、对相关影响因素的驱动作用及制约作用进行深入分析;此外,基于数据的可得性考虑,本文采用基于经验参数核算各省区的生态福祉,尽管与谢高地等应用改进方法得出的同期(2010 年)中国大陆人均生态系统服务价值存在差异[48],但二者在整体趋势上具有较高一致性,表明本文所用经验参数具有一定可靠性。当然,在获取更加精确的土地利用数据的基础上,未来这一静态量化方法还有进一步完善的空间[50],当前所得结果仅仅是对中国大陆将“绿色发展战略”提升为“生态文明战略”的 10 余年之间真实情况的粗略估算,未来还需通过精确数据在更长的时间序列内开展实证研究。回顾前文,可初步得到以下几点结论:

(1)研究时段内中国大陆省际人均生态福祉的基尼系数介于 0.798—0.806 之间,处于极不平均状态;省际生态-经济效率的标准差介于 2.110—7.716 之间,离散程度相对较高;

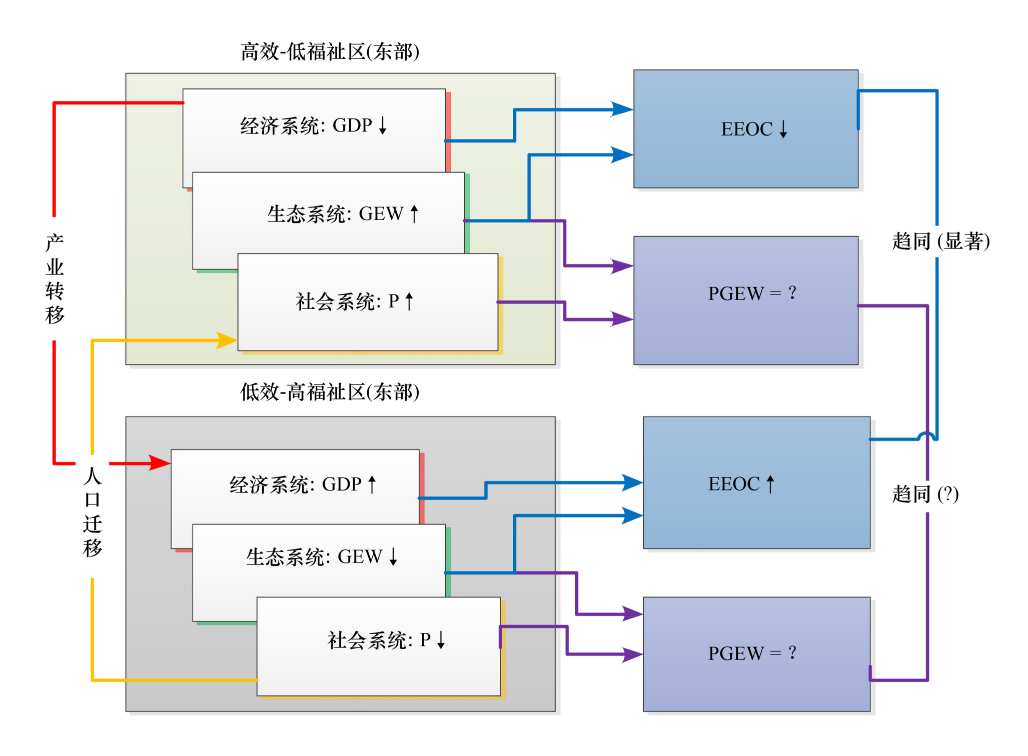


图 4　产业转移与人口迁移对区域生态-经济效率及人均生态福祉的影响机制

Fig.4　The influence mechanism of industrial transfer and population migration on regional eco economic efficiency and per capita ecological well-being

PGEW：人均生态福祉 Per capita gross of ecological well-being，EEOC：生态经济产出效率 Eco-economic output efficiency

(2)研究时段内中国大陆人均生态福祉及生态-经济效率的全局性 σ-收敛特征均不明显,未来一段时期中国大陆仍将在一定程度上面临省际生态福祉的不公平问题;

(3)研究时段内中国大陆省际人均生态福祉呈现绝对 β-收敛趋势,但速度较慢(仅为 0.16%),生态-经济效率不具备绝对 β-收敛特征、但在科技进步及科研投入要素的显著驱动作用下呈现条件 β-收敛趋势;

(4)研究时段内中国大陆人均生态福祉及生态-经济效率在"胡焕庸线"西北和东南方向上的省际分异现象明显,其重心分别位于青海和安徽境内并分别以年均 5.76 km 和年均 3.95 km 的速度向东北、西北方向移动。

参考文献(References):

[1]　Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
[2]　Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington: Island Press, 1997.
[3]　de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics, 2002, 41(3): 393-408.
[4]　Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment. Washington, DC: Island Press, 2003.
[5]　傅伯杰, 赵文武, 陈利顶. 地理-生态过程研究的进展与展望. 地理学报, 2006, 61(11): 1123-1131.
[6]　李双成, 王珏, 朱文博, 张津, 刘娅, 高阳, 王阳, 李琰. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. 地理学报, 2014, 69(11): 1628-1639.
[7]　马凤娇, 刘金铜, Eneji A E. 生态系统服务研究文献现状及不同研究方向评述. 生态学报, 2013, 33(19): 5963-5972.
[8]　Zhang Y M, Zhao S D, Guo R C. Recent advances and challenges in ecosystem service research. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(1): 82-90.
[9]　Bennett D E, Gosnell H. Integrating multiple perspectives on payments for ecosystem services through a social-ecological systems framework. Ecological Economics, 2015, 116: 172-181.
[10]　Pascual M, Miñana E P, Giacomello E. Integrating knowledge on biodiversity and ecosystem services: Mind-mapping and Bayesian Network modelling. Ecosystem Services, 2016, 17: 112-122
[11]　Kovács E, Kelemen E, Kalóczkai Á, Margóczi K, Pataki G, Gébert J, Málovics G, Balázs B, Roboz Á, Kovácse E K, Mihók B. Understanding

the links between ecosystem service trade-offs and conflicts in protected areas. Ecosystem Services, 2015, 12: 117-127.
[12] Gissi E, Gaglio M, Reho M. Sustainable energy potential from biomass through ecosystem services trade-off analysis: the case of the Province of Rovigo (Northern Italy). Ecosystem Services, 2016, 18: 1-19.
[13] Jopke C, Kreyling J, Maes J, Koellner T. Interactions among ecosystem services across Europe: bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. Ecological Indicators, 2015, 49: 46-52.
[14] Villasante S, Lopes P F M, Coll M. The role of marine ecosystem services for human well-being: disentangling synergies and trade-offs at multiple scales. Ecosystem Services, 2016, 17: 1-4.
[15] Fischer A, Eastwood A. Coproduction of ecosystem services as human - nature interactions—an analytical framework. Land Use Policy, 2016, 52: 41-50.
[16] Liquete C, Cid N, Lanzanova D, Grizzetti B, Reynaud A. Perspectives on the link between ecosystem services and biodiversity: the assessment of the nursery function. Ecological Indicators, 2016, 63: 249-257.
[17] Egoh B, Rouget M, Reyers B, Knight A T, Cowling R M, van Jaarsveld A S, Welz A. Integrating ecosystem services into conservation assessments: a review. Ecological Economics, 2007, 63(4): 714-721.
[18] Wainger L A, King D M, Mack R N, Price E W, Maslin T. Can the concept of ecosystem services be practically applied to improve natural resource management decisions?. Ecological Economics, 2010, 69(5): 978-987.
[19] Lautenbach S, Kugel C, Lausch A, Seppelt R. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 676-687.
[20] Yoskowitz D W, Werner S R, Carollo C, Santos C, Washburn T, Isaksen G H. Gulf of Mexico offshore ecosystem services: relative valuation by stakeholders. Marine Policy, 2016, 66: 132-136.
[21] Lee H, Lautenbach S. A quantitative review of relationships between ecosystem services. Ecological Indicators, 2016, 66: 340-351.
[22] 李琰, 李双成, 高阳, 王羊. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架. 地理学报, 2013, 68(8): 1038-1047.
[23] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.
[24] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. 地理学报, 2011, 66(12): 1618-1630.
[25] 甄霖, 刘雪林, 李芬, 魏云洁, Koenig H. 脆弱生态区生态系统服务消费与生态补偿研究: 进展与挑战. 资源科学, 2010, 32(5): 797-803.
[26] 焦雯珺, 闵庆文, 成升魁, 甄霖, 刘雪林. 生态系统服务消费计量——以传统农业区贵州省从江县为例. 生态学报, 2010, 30(11): 2846-2855.
[27] 刘雪林, 甄霖. 社区对生态系统服务的消费和受偿意愿研究——以泾河流域为例. 资源科学, 2007, 29(4): 103-108.
[28] 魏云洁, 甄霖, Batkhishig O, 刘雪林, 李芬, 杨莉. 蒙古高原生态服务消费空间差异的实证研究. 资源科学, 2009, 31(10): 1677-1684.
[29] 杨莉, 甄霖, 潘影, 曹晓昌, 龙鑫. 生态系统服务供给-消费研究: 黄河流域案例. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 131-138.
[30] 臧正, 邹欣庆. 基于生态系统服务理论的生态福祉内涵表征与评价. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1085-1094.
[31] 张彪, 谢高地, 肖玉, 伦飞. 基于人类需求的生态系统服务分类. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(6): 64-67.
[32] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
[33] 郑德凤, 臧正, 赵良仕, 孙才志. 中国省际资源环境成本及生态负荷强度的时空演变分析. 地理科学, 2014, 34(6): 672-680.
[34] Johnston R J, Russell M. An operational structure for clarity in ecosystem service values. Ecological Economics, 2011, 70(12): 2243-2249.
[35] Mäler K G, Aniyar S, Jansson Å. Accounting for ecosystem services as a way to understand the requirements for sustainable development. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(28): 9501-9506.
[36] 臧正, 邹欣庆. 中国大陆省际生态-经济效率的时空格局及其驱动因素分析. 生态学报, 2016, 36(11), DOI: 10.5846/stxb201506021108
[37] Barro R J, Sala-i-Martin X. Convergence. Journal of Political Economy, 1992, 100(2): 223-251.
[38] Sala-i-Martin X. The classical approach to convergence analysis. The Economic Journal, 1996, 106(437): 1019-1036.
[39] 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析. 生态学报, 2014, 34(5): 1085-1093.
[40] 中华人民共和国国家统计局. 2002-2014 年中国统计年鉴[2016-01-01]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj.
[41] 中华人民共和国中央人民政府. 粮食局等部门部署 2012 年玉米和大豆临时收储工作. (2012-11-21) [2016-01-01]. http://www.gov.cn/gzdt/2012-11/21/content_2271750.htm.
[42] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发 2012 年小麦最低收购价执行预案的通知. (2012-05-21) [2016-01-01]. http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201205/t20120523_481328.html.
[43] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发 2012 年中晚稻最低收购价执行预案的通知. (2012-08-28) [2016-01-01]. http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201209/t20120903_503554.html.
[44] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 7 月国内市场粮食价格基本稳定. (2012-08-27) [2016-01-01]. http://finance.stockstar.com/SS2012082700003002.shtml.
[45] 中华人民共和国国土资源部. 中国国土资源综合统计年鉴. 北京: 地质出版社, 2002-2014.
[46] 诸大建, 张帅. 生态福利绩效及其与经济增长的关系研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(9): 59-67.
[47] Simonis U. Ecological modernization of industrial society: three strategic elements. International Social Science Journal, 1989, 41(121): 347-361.
[48] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
[49] 刘晏伶, 冯健. 中国人口迁移特征及其影响因素——基于第六次人口普查数据的分析. 人文地理, 2014, 29(2): 129-137.
[50] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.